

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИДА МОДУЛЯЦИИ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ СПЕКТРА ЧЕТНЫХ СТЕПЕНЕЙ

*Завадский А.Л., старший оператор научной роты Межвидового центра подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебного и испытательного);*

*Казак П.А., начальник отделения отдела Межвидового центра подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебного и испытательного), e-mail: kazak-pavel.89@yandex.ru;*

*Каданцев С.М., начальник цикла Межвидового центра подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебного и испытательного).*

## AUTOMATIC MODULATION CLASSIFICATION OF PHASE SHIFT KEYED SIGNALS USING SPECTRUM ANALYSIS STRUCTURES OF THE RANGE OF EVEN DEGREES

*Zavadskiy A.L., Kazak P.A., Kadantcev S.M.*

*In this paper, we propose a shift-keyed signals modulation type recognition algorithm under conditions of lacking priori data on signal parameters. Algorithm is based on power conversion of signals and extracted specters given the presence of expressed harmonics.*

**Key words:** modulation, recognition, shift-keyed signals, conversion of signals, extracted specter.

**Ключевые слова:** фазоманипулированный сигнал, PSK, быстрое преобразование Фурье, степенные преобразования, дисперсия,  $\delta$ -функция, гармоники.

### Введение

Основным способом передачи информации в современных системах связи является цифровой обмен. Решение задачи поиска и обнаружения сигналов с цифровыми видами модуляции сводится, как правило, к получению так называемых «внешних» параметров сигнала: несущая частота, ширина спектра, уровень и пеленг источника радиоизлучения (ИРИ).

Определение «внутренних» технических характеристик сигнала (вид модуляции, скорость передачи и др.) является не менее важной задачей при техническом анализе исследуемого сигнала, так как позволяет классифицировать тип передающего устройства, способ организации связи и определить систему связи в целом.

Существующие стандарты и системы связи широко используют PSK модуляцию. В табл. 1 по результатам анализа [10, 11, 15, 16, 20] приведены основные виды современных сигналов с фазовой модуляцией.

Несмотря на разницу в способе модуляции, различие цифровых сигналов на основе их временного и спектрального представления достаточно затруднено и,

*Предложен алгоритм определения типа модуляции фазоманипулированных сигналов в условиях отсутствия априорных данных о параметрах сигнала. Алгоритм основан на степенных преобразованиях сигналов и анализе полученных спектров с учётом наличия выраженных гармоник.*

как следствие, затруднена идентификация вида модуляции. На рис. 1 представлены спектры различных видов PSK модуляции. Без дополнительной обработки невозможно однозначно определить вид модуляции сигнала.

Достаточно широкий обзор современных методов распознавания модуляции представлен в статье [13]. Особое внимание уделено рассмотрению алгоритмов, основанных на вейвлет-преобразовании и свойствах кумулянтов различных порядков. В частности, в работе [7] приведен алгоритм идентификации сигналов с модуляциями QPSK и GMSK с использованием вейвлет-преобразований. Метод позволяет распознавать сигналы с вероятностью 97,8 % при SNR (signal-to-noise ratio) 5дБ. В работе [2] продемонстрированы схожие результаты для видов модуляции 2ASK, 2FSK, 2PSK, 4ASK, 4FSK, 4PSK, 16QAM. Задача определения вида модуляции в работах [1, 3, 14] решена на основе сравнения статистических коэффициентов, учитывающих амплитуд-

Таблица 1. Область применения сигналов с PSK модуляцией

Вид модуляции	Область применения
BPSK	СРНС ГЛОНАСС, СРНС GPS
QPSK	Спутниковая система связи Inmarsat Fleet FSS, система связи PHS
DQPSK	Система транкинговой связи TETRA, система связи DAMPS
OQPSK	Система связи стандарта CDMA, технология беспроводных сетей ZigBee
8PSK	Системы связи стандарта W-CDMA/NA, TDMA/CDMA
D8PSK	Стандарт IMT-DS, стандарт микросотовой системы DECT EP

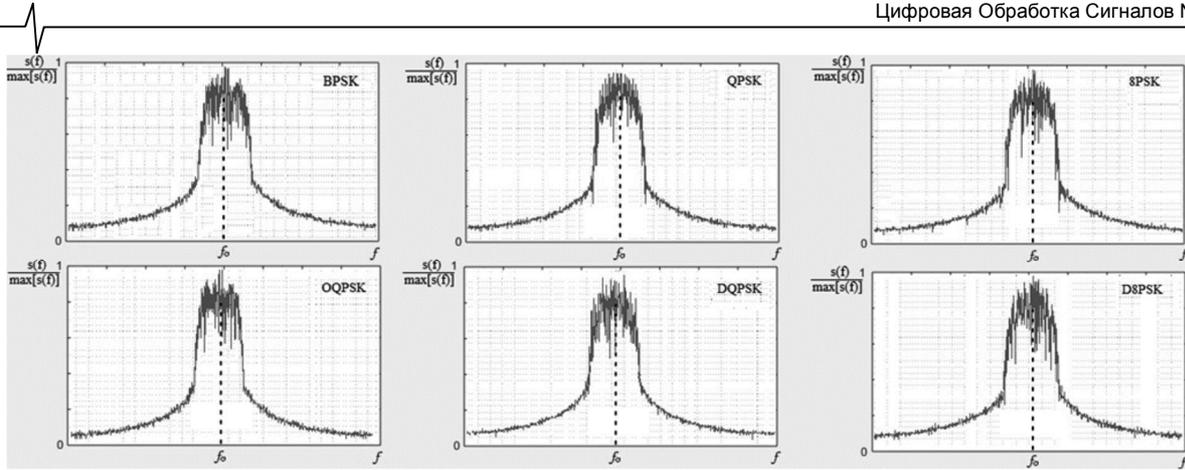


Рис. 1. Нормированные спектры сигналов с фазовой модуляцией

литудные, фазовые и частотные характеристики, а также дисперсию амплитуды нормированных спектров сигнала. Для SNR 10 дБ вероятность правильного обнаружения сигналов с модуляциями ASK, FSK, PSK 2 и 4 порядков не хуже 98,3 %. В статье [3] введен и испытан дополнительный параметр для различения M-PSK и M-FSK модуляции. В работе [4] представлена древовидная методика определения цифровой модуляции, а также Байесовский метод. В статье [5] рассмотрена модель классификации M-позиционной QAM модуляции с применением кумулянтов, которая определяет число точек сигнального созвездия в условиях низкого SNR (0 дБ) с вероятностью 100 %. Кроме того, методы кумулянтного анализа предложены в работах [6, 8, 21]. Авторами описаны алгоритмы, позволяющие с вероятностью до 100 % идентифицировать BPSK, QPSK и 8PSK модуляции при SNR 8 дБ.

Раздел «Коррелятивные и другие перспективные методы» рекомендаций [19], содержит традиционные способы определения вида модуляции PSK сигналов. В одном из способов предложено использовать инструменты спектрального корреляционного анализа. Такой метод является предпочтительным с точки зрения энергетической зависимости SNR, но требует существенного набора априорных сведений о принимаемом сигнале. В работе [12] был изложен алгоритм идентификации фазоманипулированного сигнала с порядком модуляции 2, 4 и 8 в условиях априорно неизвестных параметров сигнала. В качестве критерия было использовано отношение дисперсий, нормированных на единицу модулей спектров сигналов, полученных с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Перечисленные алгоритмы не учитывают особенностей различения дифференциальных видов фазоманипулированных сигналов. Предлагаемый ниже алгоритм позволяет автоматически классифицировать вид модуляции сигнала с неизвестными параметрами (амплитуда, ширина спектра, начальная фаза, частотный сдвиг, скорость и т.д.), при условии определения наличия сигнала с фазовой модуляцией на входе цифрового устройства.

**Математическая модель идентификации вида модуляции**

ФМ сигнал в комплексной форме имеет вид:

$$s(t) = A \cdot e^{j(\omega_0 t + \Phi(t) + \varphi_0)}, \tag{1}$$

где  $A$  – амплитуда,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – частота сигнала,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\Phi(t)$  – закон изменения фазы.

Так как алгоритм предполагает идентификацию вида модуляции при условии отсутствия априорных сведений о начальной фазе сигнала, значением  $\varphi_0$  можно пренебречь.

$$s(t) = A \cdot e^{j(\omega_0 t + \Phi(t))} \text{ либо} \tag{2}$$

$$s(t) = A \cdot e^{j\omega_0 t} \cdot e^{j\Phi(t)} \tag{3}$$

Закон изменения фазы для ФМ сигнала можно записать как:

$$\Phi(t) = \frac{2\pi k(t)}{m}, \tag{4}$$

где  $m$  – число, определяющее количество точек в сигнальном созвездии,  $k(t)$  может принимать значения  $[0, 1, \dots, m-1]$  – целые числа, определяющие условие кодирования информации. Смена значений  $k(t)$  происходит с периодом  $T_s = 1/f_s$ , где  $f_s$  – символьная скорость.

Для BPSK модуляции ( $m = 2$ ) закон изменения фазы принимает следующий вид:

$$\Phi(t) = \frac{2\pi k(t)}{2}, \quad k = [0, 1] \tag{5}$$

$$\Phi = \begin{cases} 0, & k = 0, \\ \pi, & k = 1. \end{cases} \tag{6}$$

Возведем комплексную огибающую BPSK сигнала в квадрат. Получим:

$$s^2(t) = A^2 \cdot e^{2j\omega_0 t} \cdot e^{2j\Phi(t)}, \tag{7}$$

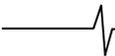
$$2\Phi = \begin{cases} 0, & k = 0, \\ 2\pi, & k = 1. \end{cases} \tag{8}$$

Фазы  $2\pi$  и 0 идентичны, следовательно,  $e^{2j\Phi(t)} = 1$ .

Таким образом, BPSK сигнал, возведённый в квадрат, можно записать как:

$$s^2(t) = A^2 \cdot e^{2j\omega_0 t} \cdot e^0 = A^2 \cdot e^{2j\omega_0 t} \tag{9}$$

Следовательно, спектральная плотность идеального BPSK сигнала при возведении во 2-ю степень имеет вид  $\delta$ -функции с центром на оси частот в точке  $2\omega_0$  [9]. На практике спектр также содержит гармоники по обе стороны от центральной частоты, отстоящие от неё на величину  $f_s$ . Также в реальных спектрах за счёт конечной ширины спектральных составляющих вместо  $\delta$ -функций, представляющих собой математическую абстракцию, наблюдаются гармоники конечной амплитуды.



Несложно доказать, что для QPSK ( $m = 4$ ) и 8PSK ( $m = 8$ ) модуляции комплексная огибающая и спектральные характеристики сигналов будут иметь схожий вид при их возведении в 4-ю и 8-ю степень соответственно.

Рассмотрим закон изменения фазы для DQPSK сигнала. Основным отличием от линейной QPSK модуляции является использование двух сигнальных QPSK созвездий, сдвинутых друг относительно друга по фазе на  $\pi/4$ :

$$\Phi_1 = \frac{\pi}{2}i, \quad i = [0, 3]; \quad \Phi_2 = \frac{\pi}{2}i + \frac{\pi}{4}, \quad i = [0, 3] \quad (10)$$

При этом если один символ содержит фазу из первого созвездия, то следующий за ним символ – в обязательном порядке из второго, а следующий снова из первого. Таким образом, задействованные созвездия с каждым символом чередуются.

Возведем сигнал, записанный в комплексной экспоненциальной форме (КЭФ) в 4-ю степень, тогда, очевидно, все точки первого созвездия собираются в одну точку, а второго созвездия – в другую:

$$4\Phi_1 = 0; \quad 4\Phi_2 = \pi \quad (11)$$

Комплексная огибающая такого сигнала совершает периодические колебания между двумя этими точками. Длительность перехода из одной точки в другую соответствует длительности одного символа  $1/f_s$ , поэтому частота этих колебаний равна  $2f_s$ . Следовательно, комплексная огибающая возведенного в 4-ю степень DQPSK сигнала имеет вид:

$$A^4 \cos\left(\frac{\omega_s t}{2}\right) = A^4 \cdot \frac{e^{-j\frac{\omega_s t}{2}} + e^{j\frac{\omega_s t}{2}}}{2}, \quad (12)$$

где  $\omega_s = 2\pi f_s$ . Это означает, что спектр такого сигнала представляет собой две несущие с одинаковой амплитудой, смещённые в обе стороны от центральной частоты на  $f_s/2$ , т.е. две несущие одинаковой величины, расстояние между которыми равно  $f_s$ . При возведении в восьмую степень спектр DQPSK сигнала будет содержать основную несущую на центральной частоте и гармоники по обеим сторонам, отстоящие от неё на частоту  $f_s$ , что легко видеть в том числе и из формулы (12).

Аналогичным способом доказывается наличие двух гармоник, также отстоящих друг от друга на частоту  $f_s$ , в спектральной плотности D8PSK сигнала, возведенного в 8-ю степень.

Рассмотрим сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией со сдвигом (OQPSK). Его созвездие также состоит из 4 точек:

$$\Phi = \frac{2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)}{4}, \quad i = [0, 3]. \quad (13)$$

Отличием сигнала от классического QPSK является наличие сдвига по времени между изменением синфазной и квадратурной составляющих. Величина этого сдвига составляет половину символьного интервала. Таким образом, сигнал OQPSK внешне представляет собой сигнал QPSK с вдвое большей символьной скоростью, у которого разрешены переходы только между соседними точками фазового созвездия, а переходы между противо-

лежащими точками, предполагающие в какой-то момент уменьшение амплитуды до нуля, запрещены.

При возведении сигнала во 2-ю степень противоположные точки созвездия объединяются. В QPSK сигнале каждый переход через ноль при этом превращается в уменьшение комплексной огибающей до нуля с последующим возвратом в исходную точку. Для OQPSK сигнала такие переходы отсутствуют, переходы возможны только из одной точки в другую, поэтому его спектр при любой сглаживающей функции содержит две гармоники, отстоящие в обе стороны от центральной частоты на половину символьной скорости эквивалентного QPSK сигнала, т.е. на символьную скорость  $f_s$  исходного сигнала OQPSK. Расстояние между данными несущими в спектре составляет величину  $2f_s$ .

Однако, при возведении в 4-ю степень спектр сигнала аналогичен QPSK. Следовательно, основным отличием в спектральном представлении OQPSK от QPSK модуляции является наличие 2-х выраженных гармоник при возведении во 2-ю степень.

### Алгоритм определения вида модуляции

В предыдущем разделе были изложены характерные зависимости поведения спектральной плотности различных видов PSK сигналов от степенных преобразований сигналов. На основе анализа результатов был разработан алгоритм идентификации PSK сигналов с учетом наличия выраженных гармоник в спектрах высших степеней. Определение наличия гармоник при обработке реальных сигналов удобно производить с использованием нормированных частотных характеристик. В таком случае спектральный уровень гармоники:

$$\max(s(f)) = 1, \quad (14)$$

где  $\max(s(f))$  – максимальное значение спектральной плотности сигнала.

С другой стороны, операция возведения сигнала в степень приводит к резкому увеличению шума, вследствие чего возникает необходимость поиска критерия, который учитывает как факт наличия несущей, так и минимальный уровень шума. В данном алгоритме предложено использовать критерий максимума дисперсии нормированного спектра сигнала. Значение дисперсии  $d$  вычисляется по формуле:

$$d = [\max(s(f)) - \overline{s(f)}]^2, \quad (15)$$

где  $\overline{s(f)}$  – усредненное значение спектральной плотности.

Отдельно стоит рассмотреть процесс различения нелинейных видов PSK. В результате воздействия шума в каналах передачи информации уровень нормированных гармоник после степенных преобразований сигнала с дифференциальными видами модуляции будет различаться, но, как правило, удовлетворяет условию:

$$\max_2(s(f)) < 0,8 \max_1(s(f)), \quad (16)$$

где  $\max_1(s(f))$ ,  $\max_2(s(f))$  – первый и второй максимумы нормированной спектральной плотности сигнала соответственно.

В этом случае расчёт дисперсии второго максимума не производится, а оценивается только его уровень.

Алгоритм идентификации PSK сигналов представлен на рис. 2.

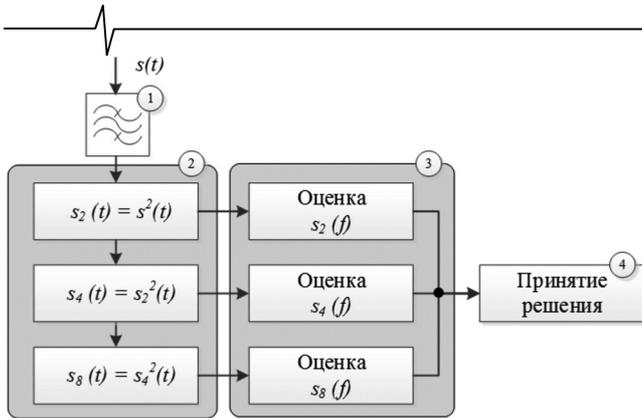


Рис. 2. Алгоритм идентификации ФМ сигналов

1. Частотная фильтрация.

Данные о центральной частоте и ширине спектра сигнала являются априорно неизвестными параметрами. Кроме того, наличие посторонних воздействий в принятой смеси существенно затрудняет процесс определения вида модуляции. Поэтому, на начальном этапе необходимо проведение частотной селекции с учетом предварительной оценки «внешних» характеристик сигнала.

2. Степенные преобразования.

PSK сигнал  $s(t)$  поочередно возводится в степень  $m = 2, 4, 8$ .

$$s_m(t) = s^m(t). \tag{17}$$

3. Оценка спектральных характеристик.

Для каждого  $s_m(t)$  вычисляется нормированный модуль Фурье-спектра сигнала  $s_m(f)$ , рассчитывается дисперсия  $d_m$  и оценивается количество и уровень гармоник с учетом условия (16).

4. Принятие решения.

На основании результатов, полученных на шаге 3, определяется вид модуляции PSK сигнала.

Обобщенные значения критериев принятия решений для каждого вида модуляции приведены в табл. 2.

Таблица 2. Количество гармоник и значения  $d_m$  для различных степеней спектра PSK сигналов

Вид модуляции	Количество гармоник, значение $d_m$		
	$s^2(t)$	$s^4(t)$	$s^8(t)$
BPSK	1   $d_2=max$	1	1
QPSK	-	1   $d_4=max$	1
DQPSK	-	2   $d_4=max$	1
OQPSK	2	1   $d_4=max$	1
8PSK	-	-	1   $d_8=max$
D8PSK	-	-	2   $d_8=max$

Анализ применения алгоритма

Для реализации алгоритма был разработан программный модуль в среде математического моделирования MATLAB [17, 18]. Задача частотной селекции при выполнении алгоритма была решена с помощью анализатора спектра Tektronix RSA5115B. Применение программного модуля адаптировано как для идентификации реальных PSK сигналов, так и для работы в тестовом режиме. Данный режим предполагает формирование цифрового сигнала с заданным видом модуляции, моделирование канала связи с аддитивным белым гауссовским шумом с выбранными параметрами и оценку вида модуляции принятой смеси.

На рис. 3 приведены полученные спектральные плотности сигналов BPSK, QPSK, DQPSK, OQPSK, 8PSK, D8PSK, при SNR 15 дБ.

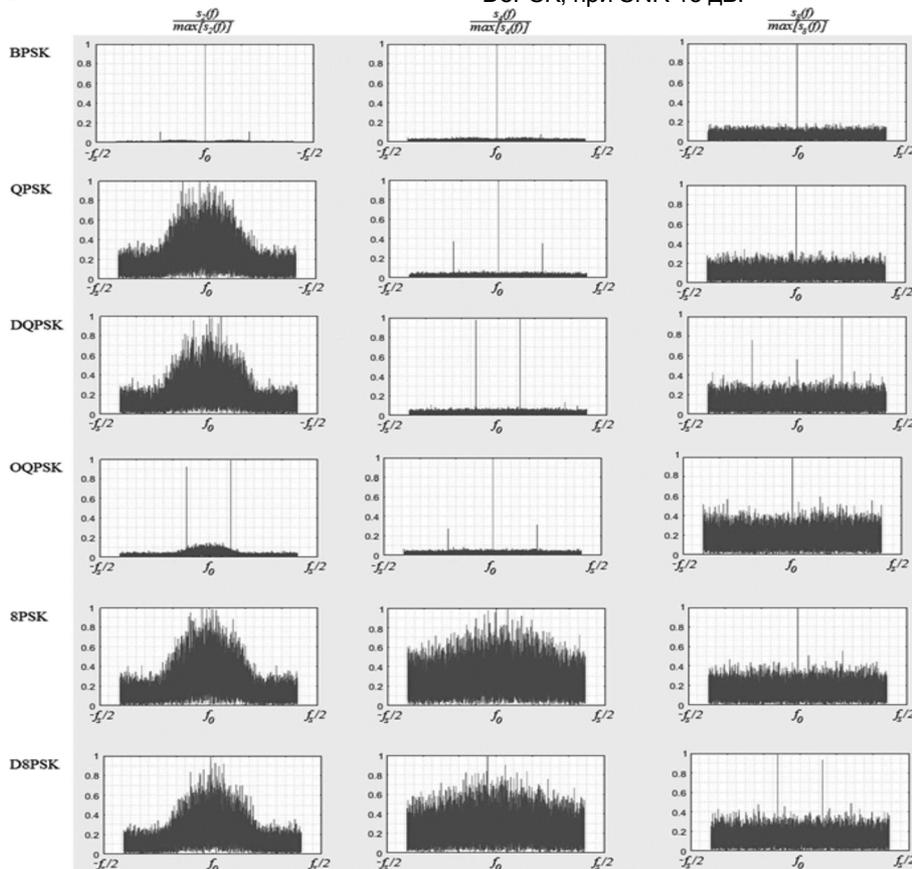


Рис. 3. Спектры сигналов BPSK, QPSK, DQPSK, OQPSK, 8PSK, D8PSK, при SNR = 15 дБ

Для каждого вида PSK сигнала был произведен расчет дисперсии нормированного модуля фурье-спектра при возведении его в степень 2, 4, 8. Полученные значения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Рассчитанные значения  $d_m$  для различных видов PSK модуляции при SNR = 15 дБ

Вид модуляции	Значение $d_m$		
	$s^2(t)$	$s^4(t)$	$s^8(t)$
BPSK	0,98	0,97	0,88
QPSK	0,54	0,96	0,80
DQPSK	0,52	0,95	0,78
OQPSK	0,83	0,96	0,69
8PSK	0,52	0,55	0,71
D8PSK	0,54	0,58	0,72

Для оценки качества функционирования алгоритма идентификации в условиях сильного воздействия шумов,

SNR изменялось в интервале от 0 до 20 дБ. Ошибка второго рода, характеризующаяся вероятностью неопределения  $P_{nr}$  (non-recognition) PSK сигналов с квадратурными видами модуляции имеет существенные значения при SNR 5 дБ ( $P_{nr} = 50\%$ ) и менее. Виды модуляции 8PSK, D8PSK могут быть однозначно распознаны при SNR >16 дБ. Вероятность идентификации BPSK сигналов на всем интервале измерений – 100%. На рис. 4 предложены графические результаты исследования помехоустойчивости алгоритма.

Рассмотрены случаи возникновения ошибок первого рода (ложного определения). Вероятность ложного распознавания модуляции  $P_{fr}$  (false recognition) при высоких SNR  $P_{fr} = 0$ , а при SNR <16 дБ не превышает 8%. Результаты появления ошибок идентификации вида PSK модуляции приведены в табл. 4.

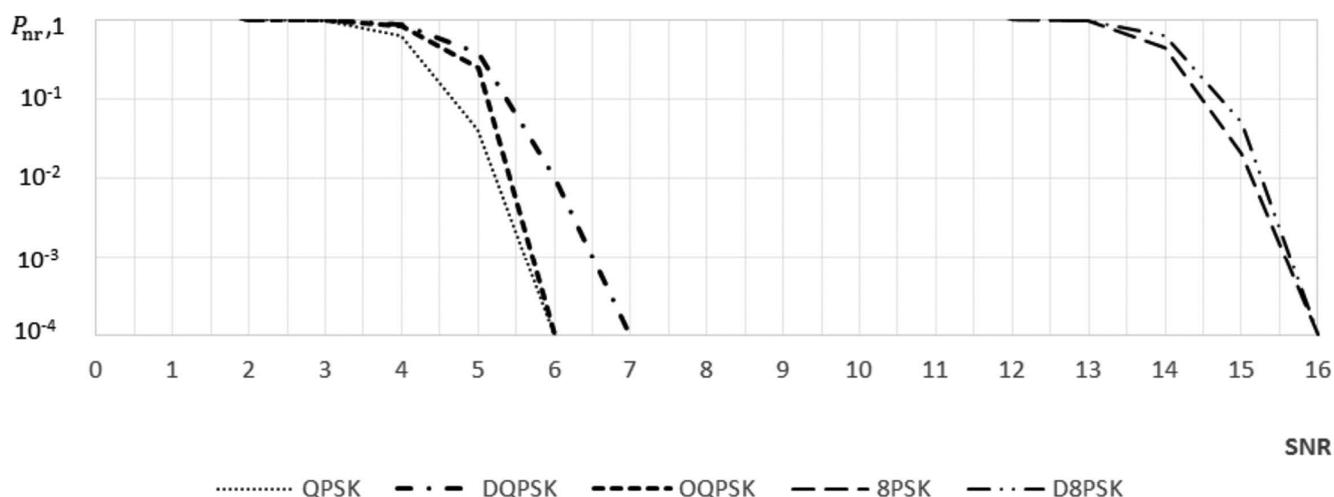


Рис. 4. Зависимость вероятности неопределения вида модуляции от SNR для сигналов QPSK, DQPSK, OQPSK, 8PSK, D8PSK

Таблица 4. Вероятность ложного определения вида модуляции

SNR, дБ	$P_{fr}, \%$					
	BPSK	QPSK	DQPSK	OQPSK	8PSK	D8PSK
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0,03	0,1	0	0	0
3	0	2,5	0,9	0,4	0	0
4	0	7,4	5,6	4,3	0	0
5	0	3,1	8,0	7,9	0	0
6	0	0,3	4,2	3,3	0	0
7	0	0	0,9	0,2	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0,7	0,3
13	0	0	0	0	2,4	1,4
14	0	0	0	0	6,5	7,9
15	0	0	0	0	2,8	7,8
16	0	0	0	0	0	0,8
17	0	0	0	0	0	0

## Заключение

В работе предложен алгоритм автоматической идентификации вида модуляции PSK сигналов в условиях априорно неизвестных параметров сигнала. Данный алгоритм позволяет идентифицировать следующие виды фазовой модуляции: BPSK, QPSK, DQPSK, OQPSK, 8PSK, D8PSK. Алгоритм основан на анализе структуры спектра четных степеней.

Проведено практическое исследование помехоустойчивости предложенного алгоритма для высокого, среднего и низкого SNR. Вероятность правильной идентификации ( $P > 0,99$ ) достигается при SNR более 6 дБ для QPSK, более 7 дБ для DQPSK и OQPSK, более 16 дБ для 8PSK и D8PSK сигналов. Сигналы с видом модуляции BPSK верно классифицировались на всем интервале измерений SNR от 0 дБ.

## Литература

1. Azzouz E.E. and Nandi A.K. Automatic Modulation Recognition of Communication Signals, Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 233.
2. Chunlei Zhang, Hui Wu, Huanyu Ning. A Novel Digital Signal Modulation Mode Recognition Algorithm. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, China. // Sensors & Transducers, Vol. 178, Issue 9, September 2014, pp. 194 – 198.
3. D. Le Guen, A. Mansour. Automatic Recognition Algorithm for Digital Modulated Signals / Proceedings of the IASTED International Conference SIGNAL PROCESSING, PATTERN RECOGNITION & APPLICATIONS June 25-28, 2002, Crete, Greece, pp. 32-37.
4. Erem Erdem. Digital Modulation Recognition / A Thesis Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Desember 2009. – 161 p.
5. Ivan A. Hashim, Jafar W. Abdul Sadah, Thamir R. Saeed & Jawad K. Ali. Recognition of QAM Signaks with Low SNR Using a Combined Threshold Algorithm. // IETE Journal of Research – January 2015. P. 9.
6. Pedzisz M., Mansour A. Automatic modulation recognition of MPSK signals using constellation rotation and its 4th order cumulant // Digital Signal Processing 15 (2005), pp. 295-304.
7. Prakasam P., Madheswaran. Modulation Identification Algorithm for Adaptive Demodulator in Software Defined Radios Using Wavelet Transform. // International Journal of Information and Communication Engineering 5:1, 2009, pp. 74-81.
8. Young A.F. Classification of Digital Modulation Types in Multipath Environments, Master's Thesis, NAVAL POSGRADUATE SCHOOL, June 2008. P. 83.
9. Баскаков С.И., Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. Для вузов по спец. «Радиотехника». / С.И. Баскаков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2003, 462 с.:ил.
10. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под Г-52 ред. В.Н. Харисова, А.И. Перова, В.А. Болдина. – М.: ИПРЖР 1998, 400 с. ил.
11. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006 г. – 656 с.: ил.
12. Логинов А.А., Морозов О.А., Хмелёв С.Л. Определение типа модуляции фазоманипулированных сигналов на основе степенных преобразований и анализа спектра. // Известия вузов. Радиофизика. Том LV, № 10-11, 2012
13. Макаров К.С. Методы распознавания модуляции // Цифровая обработка сигналов №1, 2014. С. 29-35.
14. Нагорнюк О.А., Павлюк В.В. Алгоритм автоматического виявлення та класифікації сигналів з цифровими видами модуляції. // ВІСНИК ЖДТУ №4 (59). С. 1-10.
15. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения. Серия изданий «Связь и бизнес», М. МЦТНИ – Международный центр научной и технической информации, ООО «Мобильные коммуникации», 2000 – 208 с.
16. Овчинников А.М., Воробьев С.В., Сергеев С.И. Открытые стандарты цифровой транкинговой радиосвязи, М., МЦТНИ, 2000
17. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций / Авторы: А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов, Е.Б. Соловьева / Изд. 2-е испр. и перераб. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 768с.: ил.
18. Павлейко М. А., Ромаданов В. М. Спектральные преобразования в MATLAB. // Спб.: Научно-образовательный центр «Электрофизика», 2007, 160 с.
19. Рекомендации МСЭ-R SM.1600-1 (09/2012) Техническая идентификация цифровой сигналов. 30 с.
20. Скляр Б.. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.
21. Стогов А.А., Терешонок М.В., Чиров Д.С., Кузьмин Г.В. Распознавание видов модуляции радиосигналов с использованием моментов высокого порядка // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт, № 1, 2012. С. 56-59.